

膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料的制备与性能

杨慧君, 李刚, 赵红艳, 王爱芹, 马玉薇, 汤骅, 王玉雪

(石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘要:以脱硫石膏、膨胀珍珠岩为主要原材料制备膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料,利用单因素实验法研究了材料制备方式、试件振捣次数、膨胀珍珠岩掺量等对其性能的影响,并确定出较优制备方式。结果表明,采用脱硫石膏与柠檬酸先混合搅拌均匀,再加入膨胀珍珠岩搅拌,最后加入水搅拌,直接成型,当膨胀珍珠岩的掺量为2.0%时,制备的复合材料绝干抗折强度、绝干抗压强度、饱水抗折强度和饱水抗压强度分别为3.83 MPa、8.92 MPa、1.66 MPa和4.26 MPa,干表观密度为1.166 g/cm³,满足规范使用要求。

关键词:脱硫石膏;膨胀珍珠岩;制备;性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.007

中图分类号:TD985 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2022)03-0037-05

火力发电厂在发电过程中会产生SO₂占主要成分的炉烟,其直接排入大气,会对环境造成污染,在加装脱硫装置后会排出大量固体脱硫石膏,其产量在2012~2016年间从5230万t增加到7100万t,且仍在逐年增长,如果不加以妥善处理,脱硫石膏的堆积将会占用大量土地资源,其所含的重金属、酸性氧化物等物质会污染环境,因此,脱硫石膏的资源化利用已经成为人们必须面对的一个重大社会问题^[1]。

目前,我国对脱硫石膏的利用主要包括做水泥缓凝剂、制备建筑石膏、硫酸钙晶须、防水块、防火板以及改良土壤等,其中,脱硫石膏在建筑方面主要被制成石膏砌块、石膏墙板、石膏粉和石膏基复合胶凝材料等^[2-4]。膨胀珍珠岩是一种天然酸性玻璃质火山熔岩,具有轻质、保温、隔热、抗老化、耐腐、无毒无味等优良性能,资源丰富,价格低廉,广泛用于建筑、轻工、铸造、医药、食品、农林园艺等行业^[5-6]。大多数学者都认识到了脱硫石膏及膨胀珍珠岩优良的发展前景,利用它们制备建筑材料,但研究重点多在于各种添加物对石膏材料的影响,对于具体的制

备过程研究较少。而且随着我国对大气污染治理的高度重视,烟气脱硫设施会越来越完善,脱硫石膏产量将持续增加,预计到2022年,我国脱硫石膏生产量将达7350万t,利用率将递增至84%,但与德国、日本等国100%的利用率相比仍存在一定的差距^[7]。因此,为了进一步提高脱硫石膏的附加值和利用率^[8],同时考虑到膨胀珍珠岩众多的优良性能,以脱硫石膏和膨胀珍珠岩为主料,并考虑到石膏的快速凝结性能,添加部分柠檬酸减缓石膏凝结速度,制备一种轻质复合材料,研究材料制备方式、试件振捣次数、膨胀珍珠岩掺量对膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料性能的影响,确定制备该复合材料的较优方式。

1 实验

1.1 原材料

脱硫石膏为新疆石河子市天富热电厂所产生的工业废渣,其主要成分为二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O);膨胀珍珠岩为宁波豫浙保温建材有限公司生产,其颗粒大小为1~4 mm;柠檬

收稿日期:2020-03-24; 改回日期:2020-04-20

基金项目:兵团重大科技项目(2016JB02);石河子大学成果转化与技术推广计划项目(CGZH201708);大学生创新计划项目(201910759043)

作者简介:杨慧君(1996-),女,硕士,主要从事建筑材料方向研究。

通信作者:李刚(1975-),男,博士,教授,主要从事建筑材料方向研究。

酸为天津市盛奥化学试剂有限公司生产；实验用水为实验室自来水。

1.2 实验仪器

实验所用主要仪器包括箱式电阻炉、水泥胶砂搅拌机、水泥胶砂振实台、电子计重秤、电热鼓风干燥箱、电动抗折试验机、万能实验机等。

1.3 实验方法

1.3.1 原材料处理

将脱硫石膏放置在温度为 350°C 的箱式电阻炉中煅烧 3 h 脱去 $3/2$ 结晶水，然后于炉中自然降温取出，放置于实验室环境中自然降至室温，过孔径 0.63 mm 的筛子，制得石膏粉。

1.3.2 试件制备

称取实验所需的原料，依次加入搅拌锅中，搅拌均匀，然后倒入尺寸为 $40\times40\times160\text{ mm}$ 的水泥胶砂三联模具中，放置于水泥胶砂振实台上，振捣成型，在实验室自然环境中放置 1 d 后拆模。每组实验做两组试模，共 6 个试件。

1.3.3 性能测试

制备好的试件在实验室环境中自然养护 7 d 后，将一组中的 3 个试件放置于温度为 $(40\pm2)^{\circ}\text{C}$ 的电热鼓风干燥箱中烘至恒重，取出称重，计算其干表观密度，测其绝干状态下的抗折、抗压强度。一组中的另外 3 个试件没入 $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ 的水

中，吸水 4 h 后取出，用湿毛巾擦干试件表面水份，测其吸水饱和状态下的抗折、抗压强度。试件性能的测试参照 GB/T 17669.3—1999《建筑石膏力学性能的测定》。

2 结果与讨论

2.1 材料制备方式对复合材料性能的影响

材料制备方式对复合材料性能的影响见图 1、2、3。其中，材料制备方式有 4 种，方式 1 是先在搅拌锅中加入石膏粉，再加入柠檬酸低速搅拌 60 s，然后加入膨胀珍珠岩低速搅拌 60 s，最后加入水低速搅拌 60 s，振捣 40 次，成型；方式 2 是先在搅拌锅中加入膨胀珍珠岩，然后加入石膏粉，再加入柠檬酸低速搅拌 60 s，最后加入水低速搅拌 60 s，振捣 40 次，成型；方式 3 是先在搅拌锅 A 中加入石膏粉，再加入柠檬酸低速搅拌 60 s，然后在搅拌锅 B 中加入水，再加入搅拌锅 A 中的混合物低速搅拌 30 s，然后加入膨胀珍珠岩低速搅拌 30 s，振捣 40 次，成型；方式 4 是先在搅拌锅 A 中加入石膏粉，再加入柠檬酸低速搅拌 60 s，然后在搅拌锅 B 中加入水，再加入膨胀珍珠岩，然后加入搅拌锅 A 中的混合物低速搅拌 60 s，振捣 40 次，成型。

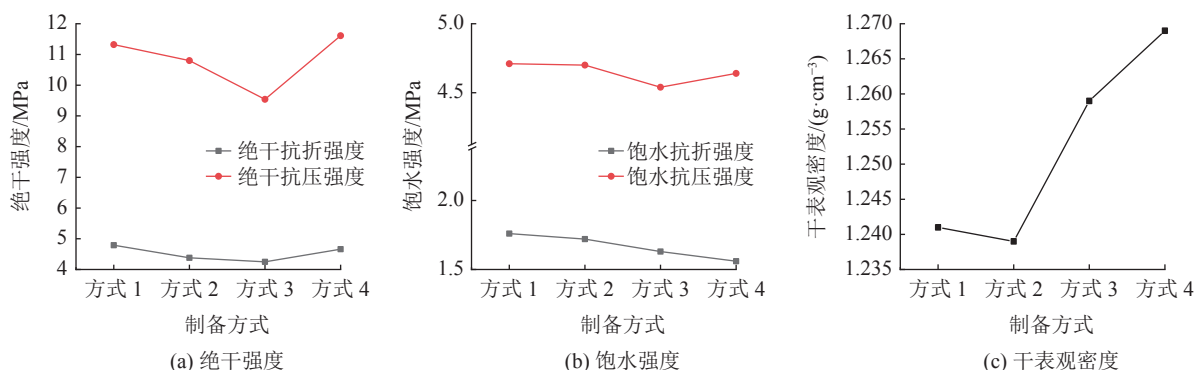


图 1 材料制备方式对复合材料性能的影响

Fig.1 Effect of material preparation method on properties of composites

从图 1 (a) 可以看出，采用方式 1 和方式 4 时复合材料的绝干强度较采用方式 2 和方式 3 时大，其绝干抗折强度、绝干抗压强度分别为 4.79 MPa 、 11.32 MPa 和 4.66 MPa 、 11.61 MPa ；从图 1 (b) 可以看出，采用方式 1 时复合材料的饱水强度较大，饱水抗折强度和饱水抗压强度分别为 1.76 MPa 、 4.71 MPa ；从图 1 (c) 可以看出，

采用方式 1 和方式 2 时复合材料的干表观密度较小，分别为 1.241 g cm^{-3} 、 1.239 g cm^{-3} ，采用方式 1 时复合材料的强度较大、干表观密度较小。这主要是由于方式 1 在石膏粉与柠檬酸充分搅拌均匀的基础上掺入膨胀珍珠岩进行搅拌，且较其余方式搅拌次数多，使得各种原料分散更均匀，然后再加入水充分搅拌，使得石膏浆体在同等用水量

的情况下流动性更好，制得的试件更优异。因此，综合考虑，方式1是较优的材料制备方式。

2.2 试件振捣次数对复合材料性能的影响

按照方式1进行原材料搅拌，采用不同振捣次数制备试件。试件振捣次数对复合材料绝干强度、饱水强度的影响分别见图2。

从图2可以看出，复合材料的强度随着试件振捣次数的减少呈降低-增加-降低的趋势，在振捣次数为5次时，其绝干抗折强度、饱水抗折强度和饱水抗压强度均达到较大值，分别为4.74 MPa、1.90 MPa和5.27 MPa，比试件振捣次数40次时分别提高了5.80%、9.83%和12.85%。随着试件振捣次数的减少，试件中的小气泡增多，试件的密度降低，强度随之降低，但当试件振捣次数为5次时，脱硫石膏浆体达到较优状态，硬化后试件

强度增加，振捣次数低于5次，强度仍然会下降。主要是因为膨胀珍珠岩的密度小于脱硫石膏，试件振捣次数越多，复合材料浆体中的膨胀珍珠岩上浮越明显，整个试件上部膨胀珍珠岩居多，整体不均匀，而当试件振捣次数为5次时，复合材料的绝干抗折强度、饱水抗折强度和饱水抗压强度均有较大值，膨胀珍珠岩均匀分散在脱硫石膏浆体中，振捣次数增加或减少，复合材料浆体均不处于较优状态，试件强度都会降低^[9]。当试件振捣次数为0次时，试件的绝干抗折强度、绝干抗压强度、饱水抗折强度和饱水抗压强度分别为3.99 MPa、9.18 MPa、1.78 MPa和4.70 MPa，同时也可满足GB/T9776—2008《建筑石膏》、JC/T 698—2010《石膏砌块》、GB/T28627—2012《抹灰石膏》的强度要求。

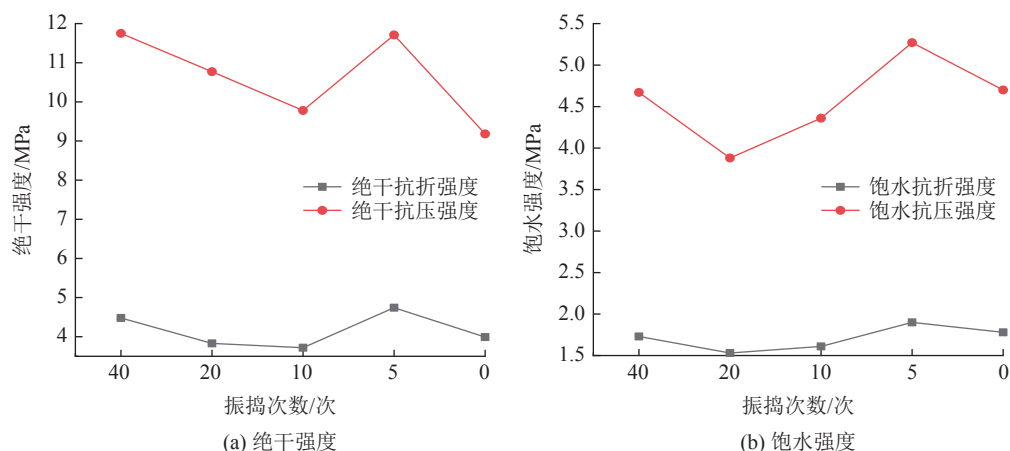


图2 试件振捣次数对复合材料性能的影响

Fig.2 Effect of vibration frequency of specimen on properties of composites

试件振捣次数对复合材料干表观密度的影响见图3。可以看出，试件振捣次数越少，复合材料干表观密度越小。当试件振捣次数为0次时，复合材料的干表观密度达到最小值，为1.213 g/cm³。由于膨胀珍珠岩是一种轻质材料，在石膏浆体中存在上浮现象，随着试件振捣次数的减少，其上浮现象减轻，可以更均匀地分散在浆体中；同时，试件振捣次数越少，浆体中存在的小气泡越多，因此，复合材料干表观密度越小。

试件分别振捣5、0次的实验结果表明在膨胀珍珠岩掺量均为0.5%的情况下，试件振捣0次时表面膨胀珍珠岩的量明显少于试件振捣5次时的量。实验过程中发现，振捣次数越多，石膏浆体流动性越好，虽然试件只振捣了5次，但其浆体

较振捣次数为0次的浆体具有更大的流动性，膨胀珍珠岩上浮明显。

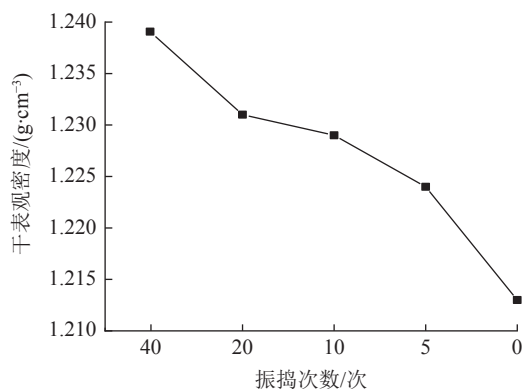


图3 试件振捣次数对复合材料干表观密度的影响

Fig.3 Effect of vibration frequency on dry apparent density of composites

综合考虑, 试件振捣次数为 0 次时, 制备的试件中膨胀珍珠岩分散更均匀, 虽然强度未达到较大值, 但满足规范规定的强度要求, 因此试件的较优振捣次数为 0 次。

2.3 膨胀珍珠岩掺量对复合材料性能的影响

选用膨胀珍珠岩掺量为 0.0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%, 在采用方式 1 进行原材料搅拌后试件直接成型的制备基础上, 研究其对复合材料性能的影响。膨胀珍珠岩掺量对复合材料绝干强度、饱水强度的影响见图 4。从图中可以看出, 随着膨胀珍珠岩掺量的增加, 复合材料的强

度呈下降趋势。其中, 当膨胀珍珠岩掺量为 1.5% 时, 其饱水抗折强度和饱水抗压强度有所增加, 分别为 1.81 MPa、4.43 MPa; 当膨胀珍珠岩掺量为 2.0% 时, 复合材料的绝干抗折强度也有所增加, 为 3.83 MPa。膨胀珍珠岩掺量增加, 其周围包裹的石膏浆体就会减少, 且膨胀珍珠岩质轻, 强度不高, 在石膏浆体中主要起填充作用, 因此, 复合材料中膨胀珍珠岩越多, 其强度越低。然而在膨胀珍珠岩掺量为 1.5%、2.0% 时, 其周围包裹的石膏浆体达到一个较优值, 复合材料强度有所增加^[9]。

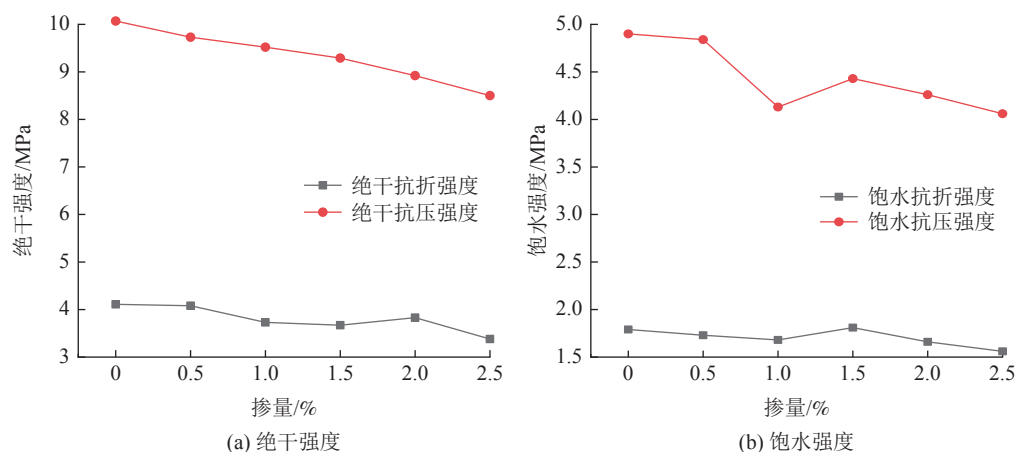


图 4 膨胀珍珠岩掺量对复合材料性能的影响

Fig.4 Effect of the content of expanded perlite on the absolute dry strength of the composite

膨胀珍珠岩掺量对复合材料干表观密度的影响见图 5。可以看出, 随着膨胀珍珠岩掺量的增加, 复合材料的干表观密度呈下降趋势。这主要是由于膨胀珍珠岩密度较石膏小, 掺量增加, 其周围包裹的石膏浆体会随之减少, 膨胀珍珠岩越

多, 石膏浆体越少。

综上所述, 考虑石膏复合材料的强度和干表观密度, 取膨胀珍珠岩的较优掺量为 2.0%。

3 结 论

石膏复合材料的制备方式、试件的振捣次数、膨胀珍珠岩的掺量均会对膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料的性能产生一定的影响。制备膨胀珍珠岩/脱硫石膏复合材料的较优方式为先在搅拌锅中加入石膏粉, 再加入柠檬酸搅拌, 然后加入 2.0% 膨胀珍珠岩搅拌均匀, 最后加入水低速搅拌 60 s, 直接成型。制得的复合材料的绝干抗折强度为 3.83 MPa, 绝干抗压强度为 8.92 MPa, 饱水抗折强度为 1.66 MPa, 饱水抗压强度为 4.26 MPa, 满足所需的强度要求。其干表观密度为 1.166 g/cm³, 较未掺入膨胀珍珠岩时降低 6.27%, 可使复合材料轻质化。

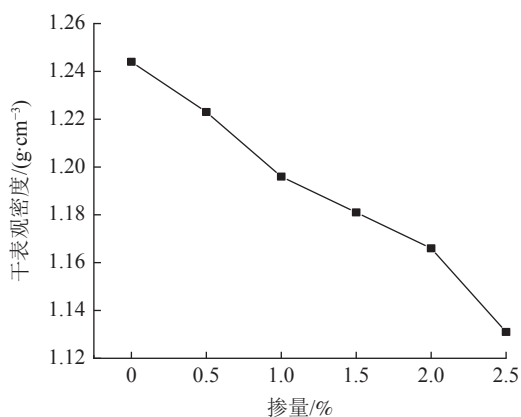


图 5 膨胀珍珠岩掺量对复合材料干表观密度的影响

Fig.5 Effect of expanded perlite content on dry apparent density of composites

参考文献：

- [1] 饶益杰, 汪丽娟, 尹祥国, 等. 脱硫石膏代替天然石膏生产加气混凝土砌块的可行性及工艺研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(7):75-78.
- RAO Y J, WANG L J, YIN X G, et al. Study on feasibility and technology of replacing natural gypsum with desulfurized gypsum for aerated concrete block production[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(7):75-78.
- [2] 尤彩霞. 我国燃煤电厂脱硫石膏综合利用概述[J]. *当代化工研究*, 2019(4):39-40.
- YOU C X. Comprehensive utilization of desulfurization gypsum in coal-fired power plants in China[J]. *Contemporary Chemical Industry Research*, 2019(4):39-40.
- [3] 苗淳, 张波, 李越. 关于脱硫石膏综合利用的研究[J]. *天津科技*, 2018, 45(S1):36-38.
- MIAO C, ZHANG B, LI Y. Research on the comprehensive utilization of desulfurization gypsum[J]. *Tianjin Science and Technology*, 2018, 45(S1):36-38.
- [4] 黎水平, 吴其胜, 张长森, 等. 脱硫石膏-棉花秸秆纤维复合墙体材料制备及性能[J]. *新型建筑材料*, 2013, 40(1):41-44.
- LI S P, WU Q S, ZHANG C S, et al. Preparation and properties of desulfurized gypsum-cotton straw fiber composite wall material[J]. *New Building Materials*, 2013, 40(1):41-44.
- [5] 姜晨, 刘文奇, 杜俊杰, 等. 膨胀珍珠岩的聚合物包覆改性研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(8):132-135.
- JIANG C, LIU W Q, DU J J, et al. Polymer coating modification of expanded perlite[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(8):132-135.
- [6] 王亮, 李珠, 刘鹏, 等. 气凝胶膨胀珍珠岩隔墙板的制备与性能[J]. *混凝土*, 2019(2):133-137.
- WANG L, LI Z, LIU P, et al. Preparation and properties of aerogel expanded perlite wall panels[J]. *Concrete*, 2019(2):133-137.
- [7] 杨冬蕾, 杨再银. 我国脱硫石膏的综合利用现状[J]. *硫酸工业*, 2018(9):4-8.
- YANG D L, YANG Z Y. Current situation of comprehensive utilization of desulfurization gypsum in China[J]. *Sulfuric Acid Industry*, 2018(9):4-8.
- [8] 李亮. 利用脱硫石膏制备发泡轻质材料的研究[J]. *无机盐工业*, 2018, 50(11):49-52.
- LI L. Study on the preparation of foaming lightweight materials from desulfurization gypsum[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2018, 50(11):49-52.
- [9] 张付奇, 李刚, 李洁, 等. 轻质耐水石膏墙体材料的制备与研究[J]. *非金属矿*, 2015, 38(6):34-36.
- ZHANG F Q, LI G, LI J, et al. Preparation and research of light water resistant gypsum walling material[J]. *Nonmetallic Ore*, 2015, 38(6):34-36.

Preparation and Properties of Expanded Perlite/Desulphurized Gypsum Composites

Yang Huijun, Li Gang, Zhao Hongyan, Wang Aiqin, Ma Yuwei, Tang Hua, Wang Yuxue
(College of Water Conservancy and Architecture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang, China)

Abstract: The expanded perlite/desulphurized gypsum composite material was prepared with desulphurized gypsum and expanded perlite as the main raw materials. The single factor test method was used to study the effects of the material preparation method, the number of vibrations of the specimen, the amount of expanded perlite on their performance, and the optimal preparation method was determined. The results show that the desulfurized gypsum and citric acid are mixed and stirred well first, then the expanded perlite is added to stir, and finally the water is added and stirred to form the specimen directly. When the content of expanded perlite is 2.0%, the absolute dry flexural strength, absolute dry compressive strength, saturated water flexural strength and saturated water compressive strength of the composite materials are respectively 3.83 MPa, 8.92 MPa, 1.66 MPa and 4.26 MPa, the dry apparent density is 1.166 g/cm³, which met the requirements of the specification.

Keywords: Desulfurization gypsum; Expanded perlite; Preparation; Performance